

超音波接合法について

大阪大学工学部

新 成 夫

1. はしがき

最近新しい材料としてチタニウム、ジルコニウム、タンタリウム、ニオブウム、ベリリウムおよびゲルマニウムなどが開発され、原子力あるいは電子工業に広く利用されるようになった。これらの金属はたがい同志が接合されて用いられるよりも、むしろ不銹鋼や銅合金などのようなほかの金属と接合されて用いられる場合が非常に多い。しかし、これらの金属はその金属的特性からして溶融溶接によつては強靱なる異種金属間接合部を得ることがほとんど不可能である。すなわち、その接合部にはぜい弱な金属間化合物が多々形成される。

また、ゲルマニウムやシリコンなどを高温において接合するときは、これらの有する半導体としての性質はほとんど失なわれることになる。

一方、耐熱材料の進歩とともに、その溶接部に要求される諸性質もより高度なものとなつてきた。そのためには、たとえば溶接部の細晶粒子の微細化あるいは均一化などをはかることにより、その疲労限が高かめられるのではないかと思う。

ここに、異種の金属接触部に超音波による振動エネルギーを与え、両者の境界面に溶融をおこさせないで固態のままに接合させたり、あるいは、溶融または半溶融状態の金属に振動エネルギーを与えて脱ガス、粒子微細化、拡散ならびに凝固温度の低下などの諸効果を与えるなど、新しい金属あるいは接合部諸性能の開発に超音波の溶接への利用というものが考えられる。

この超音波による接合法は J. B. Janes がアルミニウムの点溶接性の向上ならびに溶接前処理の簡易化に超音波を適用する研究に、偶然超音波だけでも接合が行なわれるというヒントを得て以来開発されてきたものである。これらの研究報告は1950年にまず発表され、引続き1953年にも報告があるが、近年 *Welding Journal* 誌その他に "Ultrasonic Welding" として掲載されて注目されるようになった。

以下に本法の概要について述べる。

2. 超音波の発生

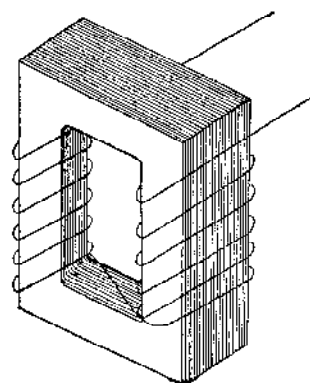
超音波は流体の突洞内における共振（ガルトン笛）と

か機械的シャッターによる流体の断続（サイレン）によつて得られるが、最近では高周波電源を用いて磁歪あるいは電歪現象によつて電氣的エネルギーを機械的振動エネルギーに変換している。

磁歪および電歪現象とは、強磁性体を磁場中に入れ磁化すると、磁場の方向に伸縮したり、また、電場中にチタン酸バリウムや水帛などを置いた場合、それが変形したりする現象をいう。

現在、接合をはじめとする金属加工方面に用いられている振動子には、磁歪型（ニッケル alfer 合金、フェライトなど）のものが多く、とくにニッケル（伸縮現象が複雑でないため）が用いられている。

ニッケル棒にコイルを巻いて、これに高周波電流を流せば、ニッケル棒に交流磁界がはたらいて棒は振動（機械的共振特性はよい）するが、これでは棒断面の渦流損失が大きいため、第1図のようにニッケル薄板（板厚0.1 mm 以下）を多数絶縁成層して巻線をほどこす。

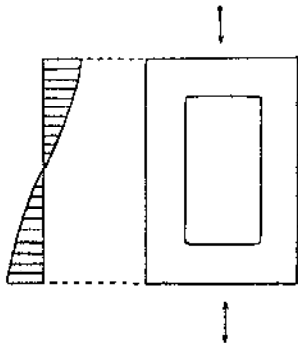


第1図 ニッケル振動子

ニッケルの磁歪現象は磁場の方向に関係しないため、高周波電流1サイクルに対して振動子は2回伸縮することになるが、このような励振方法は非常に効率が悪いので、普通は、まずコイルに直流を通して少し縮ませておき、その上に高周波を重ねとなるようにし、さらに励振電流の周波数を振動子の機械的固有周波数に一致させるようにして、ニッケル振動子を強く振動させている。

ニッケル振動子には多数の機械的共振点があるが、通常その中でもつとも周波数の低い長辺方向の縦振動を利用するとよい（第2図）。

* 溶接工学科・工博

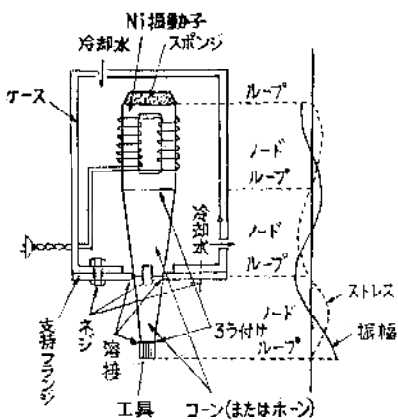


第2図 振動分布図

このようにして発生した振動を、適当な振幅に拡大させるために振動子の端面にコーン（ホーンとも呼ばれる。機械変成器）を接続せしめる。すなわち、コーン機械的共振周波数を振動子のそれに一致させるとコーン先端の振幅を増大することができる。

そして、コーンの先端に工具を取り付けて、全体を縦振動の共振周波数で駆動しながら、適当な加圧のもとに被加工物に作用させる。

いま、振動系各部の縦振動の振幅とストレスの分布状況を示すと第3図のようである。



第3図 振動系

もちろん、コーンの材質、形状が超音波出力その他の効率を左右することはいうまでもないが、一般的にいうと、コーンの先を細くするほど振幅拡大率は大きくなる。しかし逆にストレスもまた大きくなるので、あまり振幅を大きくすることはコーンを破損することになる。

コーンは円錐コーンなど要求に応じて種々の形のものが用いられるが、要は工具端にいたるにしたがい細くすることである。

また、コーンの長さは、通常振動子とコーンとの接合部が弱点であるので、そこがストレスのノード（節）になるようにコーンの長さを定めるべきである。

つぎに振動子系の支持は振幅を低下させないためにも、また精度保持のためにも重要である。実際には、コーンおよび工具の取付け方あるいは工具の摩耗などにより共振周波数が変化するため、ノードの位置も変化し移動する。したがって、通常の規定の周波数の場合のノードをそれよりやや異なつた共振周波数をもつ支持フランジのループで支持するようにしている。

なお、注意すべきことは振動子とコーンとの接合部（通常らう付け）、コーン同志（2～3個の連結コーンを用いる場合）の接合部、コーンと工具との接合部（溶接またらう付けには実際が残らないよう、できるだけ均一に接合すべきである。

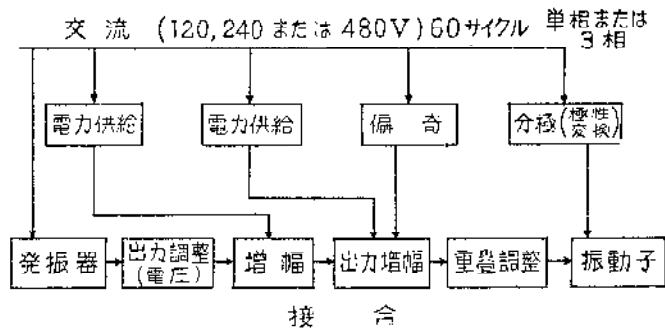
3. 接合装置

超音波接合装置は次の部分により構成されている。

- (1) 超音波発振器（高周波発振器）
- (2) 振動子（トランスデューサー）
- (3) 振動伝達機構（カップリングシステム）
- (4) 上下接合用チップおよび加圧送り機構
- (5) 各種自動制御

3-1 高周波発振器

接合装置に用いる高周波発振器には通常電子管方式のもと電動機と交流発電機が組合わされたものの二つの



第4図 超音波接合装置の電気配置図

タイプがある。第4図は電子管方式の代表的な電気配置図を示したものである。この方式では4つの主な部分よりなつている。すなわち、高周波を発生するオシレーター、出力を増大せしめるための増幅器、オシレーターと増幅器の両方に電気を供給する装置および振動子（トランスデューサー）の極性を変える装置よりなつている。このオシレーターは60サイクルの入力電流を、振動子を運転させるに必要な高周波に変換せしめる装置である。

電圧調整管ならびにほかの装置は一定の接合を行なうためにもうけられたものであつて、周波数を安定させるため通常オシレーター回路におかれる。増幅器は変圧器とインピーダンス、ネット・ワークを通して、振動子へ

オシレーターからの高周波電流を増幅して伝達する。

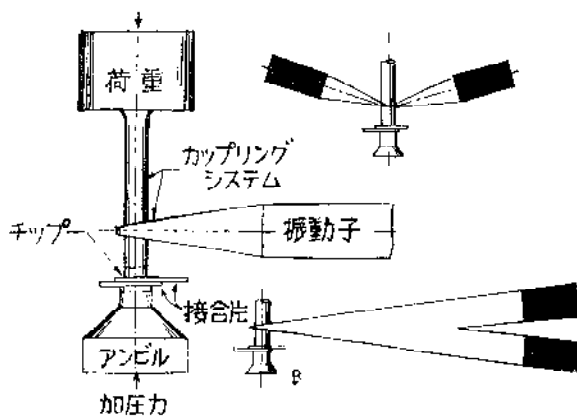
つぎに電動機と交流発電機とを組合わせた高周波発振器は、電子管方式のものにみられたような振動子を成極するための装置は無いが、振動子をはたらかせるために必要なほかの部分は全部そなえている。この装置は連続運転に対してなんら支障を生じない。

これらの接合装置用の電源は、通常異常運転や事故に対して安全装置を有している。メイン・スイッチは全装置の防御の役割をし、各部にわかれたすべての回路にはフューズが取り付けられている。また、高圧がかかる以前に運転温度に達するように水銀蒸気調整器をそなえている。過負荷調整リレーは出力増幅器の出力管を保護しており、出力変圧器は運転のまずさからおこる危険に対して保護するために、スパークの間隙を必要としている。

以上のようにして高周波が発生せられるが、ここで注目すべきことは実際の接合に際してたえず一定の周波数（振動数を意味する）に保つにはいかにすればよいかということである。このためには“周波数自動追尾”装置をそなえた高周波発振器が用いられる。

3・2 カップリングシステム

超音波接合装置においてもつとも重要な部分は電気的エネルギーを機械的振動エネルギーに変換させ、この振動エネルギーを接合部へ伝達させるところのカップリングシステムである。第5図はカップリングシステムの概要を示したもので、これは振動子、コーンチップなどを包含するものである。



第5図 トランスデューサー・カップリングシステムの概略図

振動子には通常連続運転などのきびしい使用条件に耐えるために、前述のようにニッケルあるいはニッケル合金の積層板が用いられる。ときにはチタン酸バリウムの様なセラミック質の振動子も用いられるが、接合装置運転中に過熱されて振動条件を変えるおそれがあるので、その冷却を厳密にしなければならない。

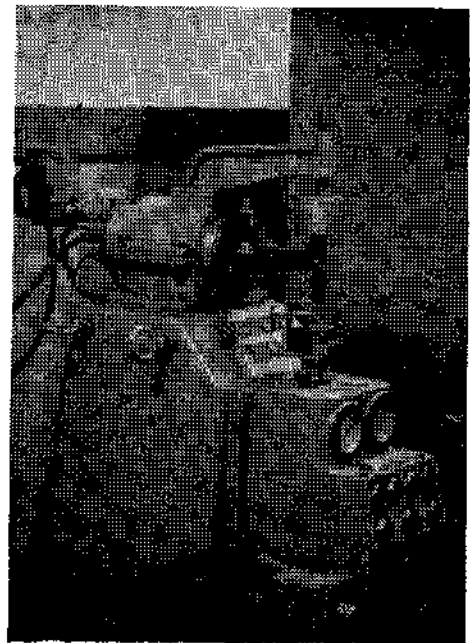
アンビルは被接合部を適当な位置に支え、被接合部に

荷重を与えると共に、超音波振動エネルギーを供給するものである。連続シーム接合ではアンビルは被接合物を移動せしめる役目もする。

通常カップリング・システムとして、ウエッジ・リード・システムとラテラル・ドライブ・システムの二つがある。

前述の（第5図）は前者に属するものである。この形式第5図において、振動子は縦方向の振動をウエッジに生じさせる。リードの上端はしつかり支えられており、ウエッジよりの振動エネルギーをチップに伝達する。したがって、チップは接合面に平行な横方向の振動をとけることになる。

同図の右上の図は、超音波出力を増大するために考えた装置で、二つの振動子が反対の相で駆動せられるようになっている。この様な多段式振動子装置の配置は実際の設計にあたって都合のよいように変えられる。この様なウエッジ・リードの方式のものは大型のスポット型接合装置に用いられている。第6図に国産の2kw スポット型接合装置を示す。



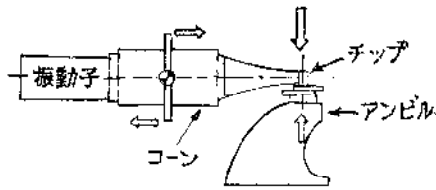
第6図 島田理化工業KK製、出力2kw スポット型超音波接合装置

つぎにラテラル・ドライブ・システムのカップリング・システムは第7図に示す様に通常小型の接合装置に用いられ、それは横方向に（チップは接合面に平行）駆動される。

被接合部に対する加圧は、カップリング・システムを通じて加えられるために、曲げ力として作用することになる。

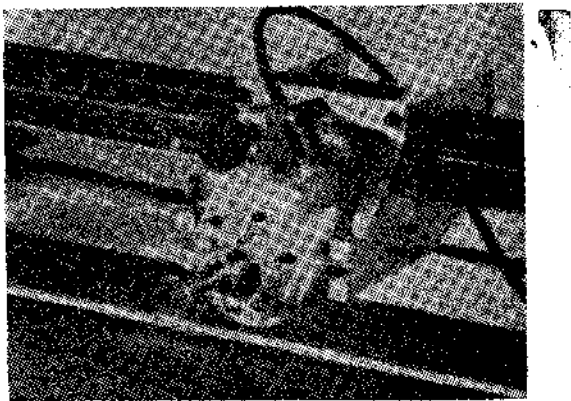
つぎに連続シーム接合装置について述べる。

連続シーム接合装置は通常ベアリング、スリップリン



第7図 横方向トランスデューサーカップリングシステム

グおよびモーターをそなえたカップリング・システムよりなっている。すなわち、円板状に回転するチップは所定の接合ラインにそつて回転接触しながら運転される。第8図はカップリング・システム (seam welder のヘッドを想像されたい) が回転移動する連続シーム接合装置



第8図ヘッドの移動する超音波連続シーム接合装置

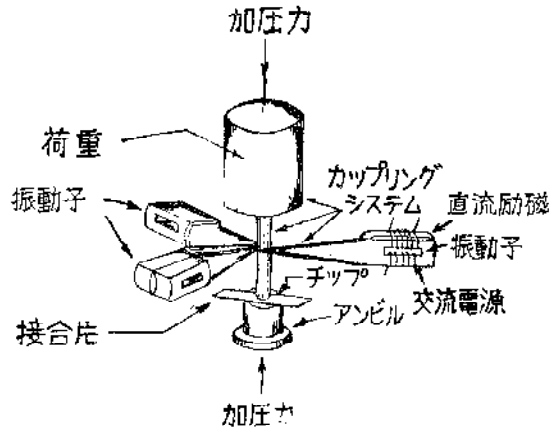
であつて、被接合材を動かし得ない場合に用いられている。すなわち、接合材を支えているアンビルは固定されておつて、チップが回転しながら超音波振動エネルギーと加圧を与えて接合される。接合速度は条件によつて異なる。

高速度接合用のローラー型の連続シーム接合装置は、被接合材料が、回転しているチップと反対方向に回転するアンビルとの間をとおるようになつている。第9図は7~10 m/min程度の速さで薄箔状のものを接合するために用いられている小型接合装置である。この種の接合装置では70 m/min以上の高速度で薄いアルミニウムを接合することができる。



第9図 連続シーム接合装置

リング接合装置は第10図に示すように、リード軸上に各振動子のウエッジが正確にとり付けられておつて、振動子からの超音波振動エネルギーは、チップに曲げとねじりとを生じしめるようになつている。



第10図 リング接合装置

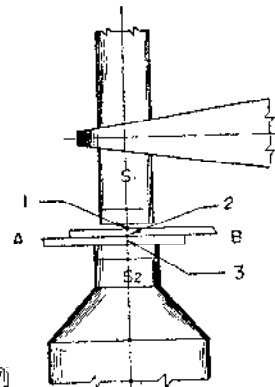
この方法はシーリングやさや状のものの接合に有効に利用され、スポット型のものよりも構造的に色々な長所をもつている。それは接合される面積が大きいばかりでなく、接合部に応力が生じないといわれている。

3・3 チップおよびアンビル

上述の様にチップおよびアンビルは被接合材を支えるだけではなく、被接合部に超音波振動エネルギーを供給するものである。すなわち、チップ及びアンビルにかかる力は、接合を行なつている間、超音波振動エネルギーの伝達を確実にすると共に、被接合材料の滑りを防ぐものである。

それから、この加圧力の作用のもとに、チップから被接合部に振動力が加えられて接合される。そのさいのチップ先端の微動 (Tip displacement) は、接合装置の型式によつて違つており、スポット型のものでは線状に、リング型のものではねじり状に動くものである。

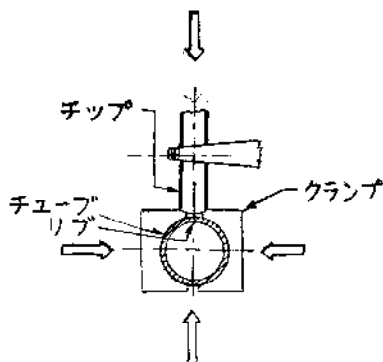
超音波接合のもつとも簡単なる接合方式は二つの平らな平行面の接合である。このような平板のスポット型接合において、チップの先端は通常円型 (または半球状のチップを用いる) に、アンビルの表面は平面に仕上げら



第11図

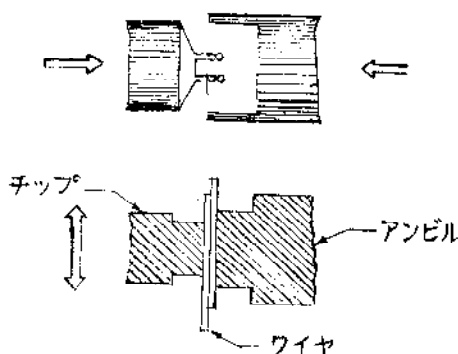
接合部の例

れている。いま第11図において、接合は被接合材料A、Bの接触面で行なわれるのであるが、少しばかりの滑りが、チップSとシートBとの接触面、アンビル S_2 とシートAとの接触面でおこる場合がある。これらの滑りは、通常接合装置ならびに被接合材料のセットのまづさによるもので、チップやアンビルに悪い影響をおよぼす。



第12図 接合部の例

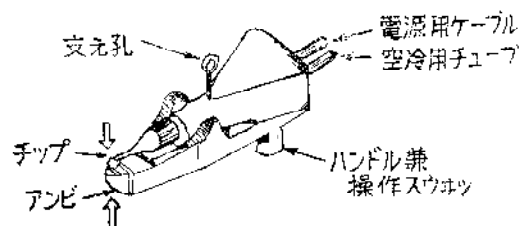
第12図はチューブで状のもの外部にリップのような形をしたものを接合するための装置である。このチップは二つ割りのジョーで締付けられ、そのときジョーは、アンビルとしての役割もする。リップと同じ輪郭をしたチップは、リップにまたがったような形で作用する。これは超音波振動エネルギーの伝達を容易ならしめるように考慮されている。



第13図 接合部の例

第13図は細いワイヤーの1組を接合するのに用いられるチップとアンビルの一例である。このアンビル面は、ワイヤーがうまくはまり込むようにくぼんだ(凹)だ溝を二本掘っており、これに対してチップもその溝にうまくはまるように二つの空起をもっている。したがって一回の接合操作で二組のワイヤーの接合が同時にできるようになっている。

これらのほか第14図に示したように低出力の簡単なポータブル型接合装置がある、これは横方向に駆動するカップリング・システムならびに気圧式加圧装置をそなえている。



第14図 ポータブル超音波接合装置

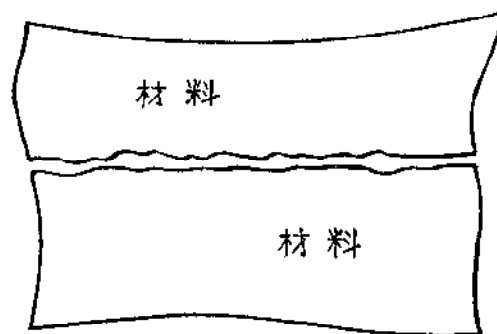
3・4 加圧送り機構

被接合部への加圧力(チップとアンビルとを加圧する力)は静的に、かつ、接合面に垂直にかけられなくてはならない。この荷重(加圧)方式は、接合装置体の包括的な設計によつて決まるものであつて、文型接合装置については油圧方式、非常に小さい加圧力を必要とする小型接合装置ではスプリング方式のものが適しているようである。

4. 接合機構

超音波による接合機構については明白にされていないが、接合部を金属学的に調べられた結果より温度上昇の形跡はあるが融合組織はみられず、また、金属間化合物の生成や相互拡散などは一般におこらないといわれており、次の様に考えられている。

第15図に示したように、被接合材料の接触面では凸起



第15図 接合前における材料接触面

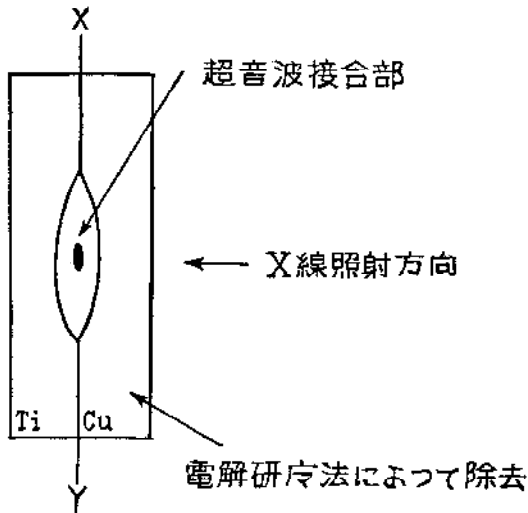
した部分だけが当たっているが、静圧力とより移動によつて凸起部が弾性変形や塑性変形をして潰され、両金属の距離がきわめて接近して原子間の吸引力が働き、摩擦熱による境界面の温度上昇がこれを助けて金属原子間ボンドができてしまうといわれている。

もちろん、このほかに個々の金属の有する送り速度、摩擦係数、熱伝導度、融点などの物理的特性、あるいは、接合面に隣り合う相間の塑性変形による発熱性などがこれに関連し、その総合結果として温度というものがその接合を支配するもつとも大きな因子といえる。

以下に、接合機構について検討した2・3の実験結果を述べる。

4・1 異種金属間接合部に対するX線の検討

超音波による接合が、接合面における(原子の移動原子の接近あるいは相互拡散を意味する)によるものとするれば、第11図に示すようにX—Y面に対する回折像はチタニウム(h・c・p)または銅(b・c・c)とは異つた回折像 Ti—Cu 合金—β—(f・c・c) または歪んだ h・c・p (あるいは f・c・c) とが得られる。



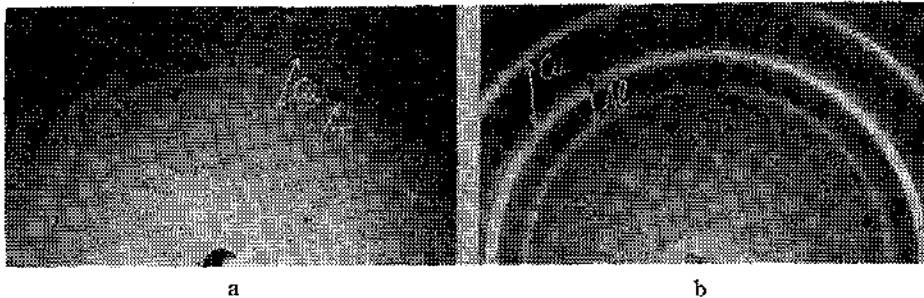
第16図 X線回折試料

この仮定のもとに種々接合条件の異なる異種金属間接合部について透過ならびに背面反対によるX線回折を行なつた。

しかし第17図—a, —bに得た回折像の1例を示したがいずれも母体金属の回折像しか得られなかつたまた、その接合層に対する電子線回折なども行なつたが、ともに予期した結果が得られなかつた。

この理由として次の三つが考えられる。

- ① 接合部で両金属原子の相互拡散が生じているのか。
- ② 拡散していたとしても、その層がきわめて薄いため。

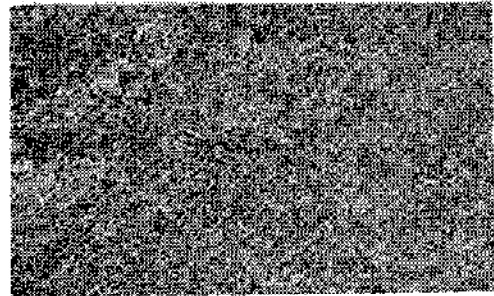


第17図 異種金属間接合境界部に対するX線回折(反射法)結果例

- a. チタニウムと銅との接合境界部 (X線回折象はチタニウム(h, c, r)と銅(f, c, c)よりのものだけ)
- b. アルミニウムと銅との接合境界部 (X線回折象はアルミニウム(f, c, c)と銅(f, c, c)よりのものだけ)

③ 拡散層は厚くとも、拡散量が少いため。

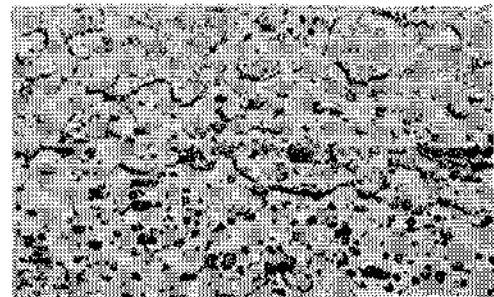
しかし、いまアルミニウムおよびチタニウム同志の接合部の斜面研磨法によつて得た組織をみるに(第18図および第19図), 超音波振動エネルギーが十分供給せられ



第18図 0.06 mmt アルミニウム同志の接合境界部 腐食液 0.5% HF (×200)



第19図 0.5mmt チタニウム同志の接合境界部 腐食液 4% HF + 10% HNO₃ (×400)



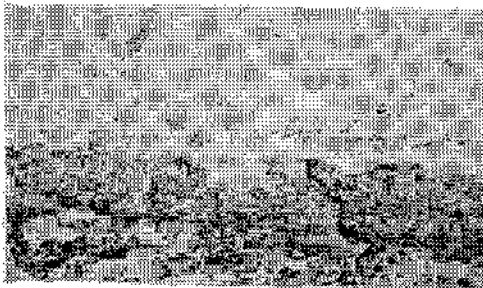
第20図 0.6 mmt アルミニウム同志の接合境界部、接合後 350°C に 15 min 加熱電解研磨

たときは、完全なる連続粒子の組織がみられる。接合がやや不完全だと思われる場合も、接合後焼なまし(350°C 15 min 加熱)するときは第20図に示したように、両金属粒子の完全に連続した組織がみられる。

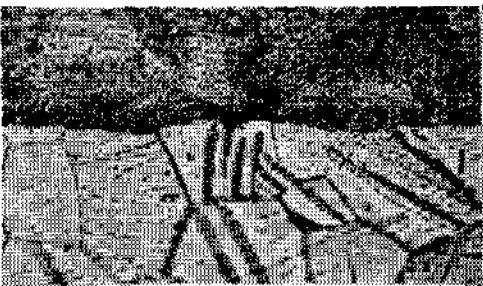
また、チタニウムと銀と銅、チタニウムと銀とステンレス鋼およびチタニウムと銅の異種材の接合部についても第21, 22および23図



第21図 0.66mmチタニウム(上)と0.007mm銀(中)と0.5mm銅(下)との接合境界部, 銅は5% FeCl₃+10% HCl にて腐食 (×1,000)



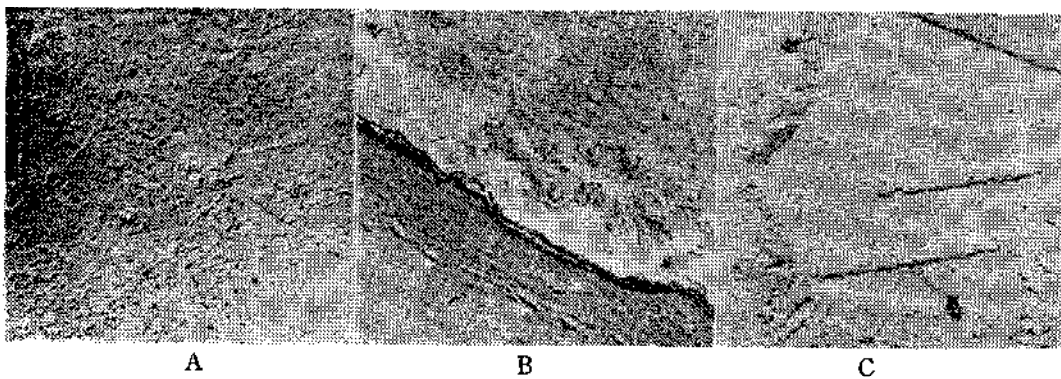
第22図 1.0mmステンレス(上)と0.007mm銀(中)と0.5mmチタニウム(下)との接合境界部, ステンレス, 銀腐食されず (×400)



第23図 0.5mmチタニウム(上) 0.5mm銅(下)との接合境界部 (×1,000)

に示したように完全なる接合組織がみられる。

これらは、チタニウムと銀と銅あるいはチタニウムと銅の接合境界部の電子顕微鏡組織(第24図)にみられるように、その境界層には非金属その他の存在物がなく、その境界層はそれぞれの母体金属粒子の境界層程度の幅



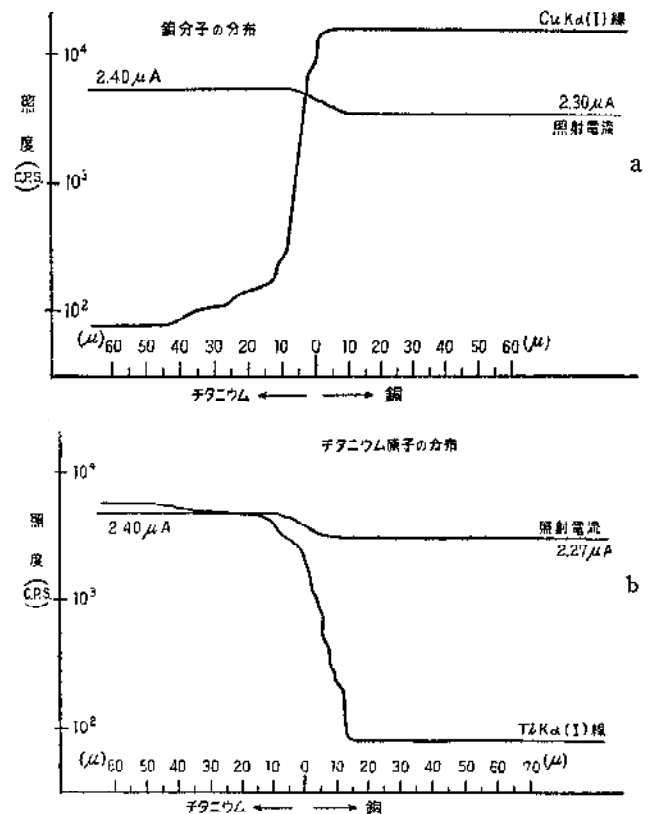
第24図 (チタニウムと銅との接合境界部)の電子顕微鏡組織, レプリカ法 (×500)
A銅 B境界(左, チタニウム 右, 銅) Cチタニウム

である。

さらに同検鏡面に対してX線マイクロアナライズを実施した。

X線マイクロアナライズは、高真空中に試料をおき、それに数 $\mu\phi$ にじぼられた電子線を当て、試料より発生するX線を単結晶によつて分光し、含有元素の特性X線の強度によつて分析(原子の分布状態の検出)を行なうものである。したがつて、超音波接合部のように原子の拡散層が非常に薄いと考えられる場合には最適の方法である。

第25図 a, bは銅とチタニウムとの接合境界部(検鏡



第25図 第23図(チタニウムと銅との接合境界部)の検鏡面に対する

- a X線マイクロアナライズの結果
- b X線マイクロアナライズの結果

面)に対するX線マイクロ, アナライズの結果を示したものである。銅, チタニウムの拡散状態をみると, 銅はチタニウムのほうに40 μ ぐらいまで尾をひいて入り込み, チタニウムは銅のほうに10 μ ぐらいまで入り, チタニウムのほうへ40 μ ぐらいまで銅が入り込んでいる部分を補償するような減り方になっている。

現在, このほかにアルミニウム銅, 銀とチタニウムなど種々の異種金属間接合部について検討中であるが, 前述の検鏡試験その他とこの結果などと総括して超音波による接合機構を考えるとそれは次のようにいえるのではないかと思う。

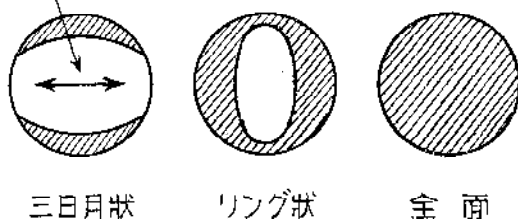
すなわち, 超音波による接合は単なる機械的接合ではなく, 両金属原子の相互拡散少なくとも相互引力によつて行なわれるものである。

4.3 接合形態

本接合法では両金属原子の相互引力によつて接合されると考えられるが, 超音波振動エネルギーがどのように伝達されるものだろうか。

上述のように, 超音波振動エネルギーが十分供給せられた場合には完全なる接合部が得られるが, 超音波エネルギーの不十分なる場合(接合条件が適正でないことを意味するには, 第26図にみられるように三日月状あるいは

チップ振動方向



第26図 接合形態



第27図 0.6mmt アルミニウム同志の接合形態 (×400) 三日月状接合の切断面組織

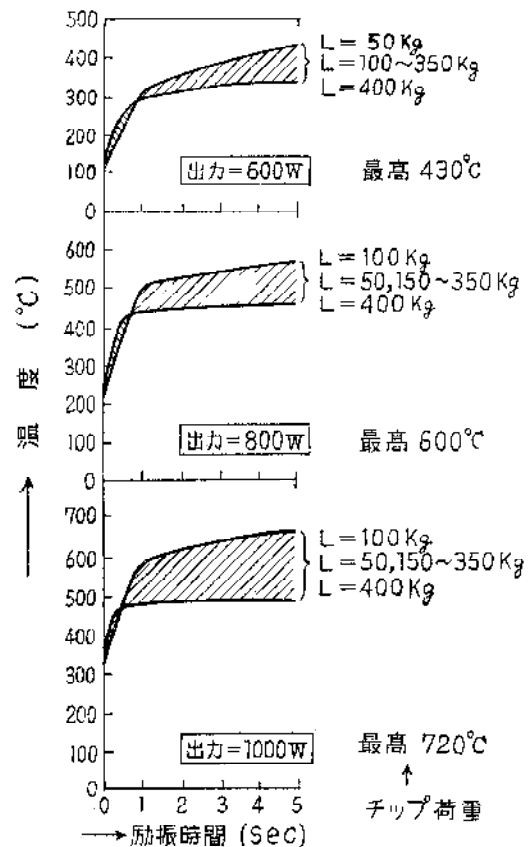
ンギ状に接合される。これは第27図の接合部をみてもわかるように, 接合部ナゲットの中心部よりも外周部のほうがより強固に接合されることである。(もちろん, この現象はチップ加圧力, 超音波出力のその他の接合条件の相違により種々異なる)

超音波接合においては, 被接合材料触面で圧縮力ならびに剪断力を受け, 摩擦による発熱をとまうと同時に両金属面が露出され, そこに両金属原子の接近が生じ, 接合されるものといえよう。

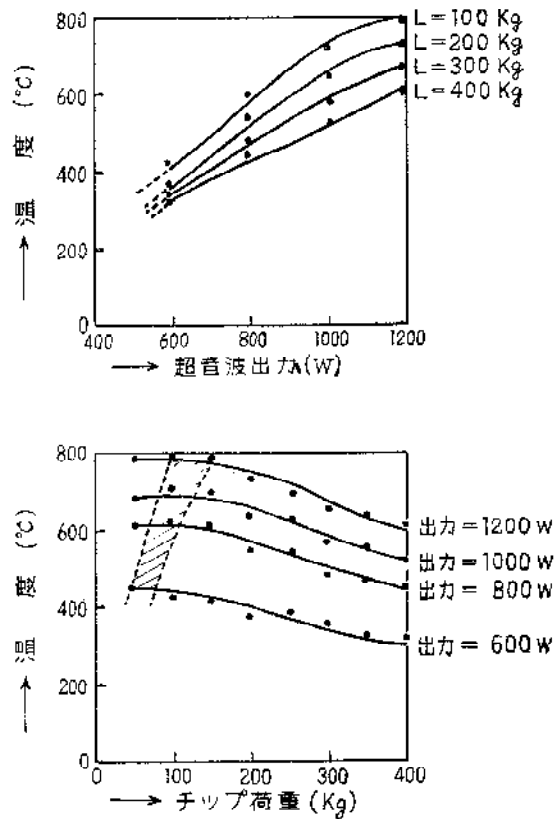
5. 超音波接合部における温度上昇

超音波接合においては, 被接合材料接触面でかなり熱の発生をとまう。いい換えれば, 接合を支配するもつとも大きな因子は熱の発生である。しからば, いま接合条件として挙げられる。

- ① 超音波出力(振幅に相当)
- ② チップ加圧力(荷重)



第28図 0.4mmt アルメル-クロメル熱電対を第10図の島田理化学工業KK製作による出力2kw スポット型超音波接合装置のチップ(先端半径70mm)とアンビル(平型)との間に挿入し, 励振条件を変化させた場合の昇温度, たゞし超音波出力ならびにチップ荷重の値は概算である。詳しくは著者超音波接合に関する研究(No. 1); 溶接学会溶接冶金研究委員会資料 9/1961を参照されたい。



第29図 超音波出力と昇温度、チップ荷重と昇温度との関係熱電対のみをチップとアンビルとの間に挿入

- ③ 接合時間
- ④ 被接合材料の種類、大きさ、加工度、表面状況.
- ⑤ チップおよびアンビルの構造、表面状況
- ⑥ 被接合材料組合せ

などの各条件が熱の発生にいかなる影響をおよぼすものか、本節においてはこれについて述べる。

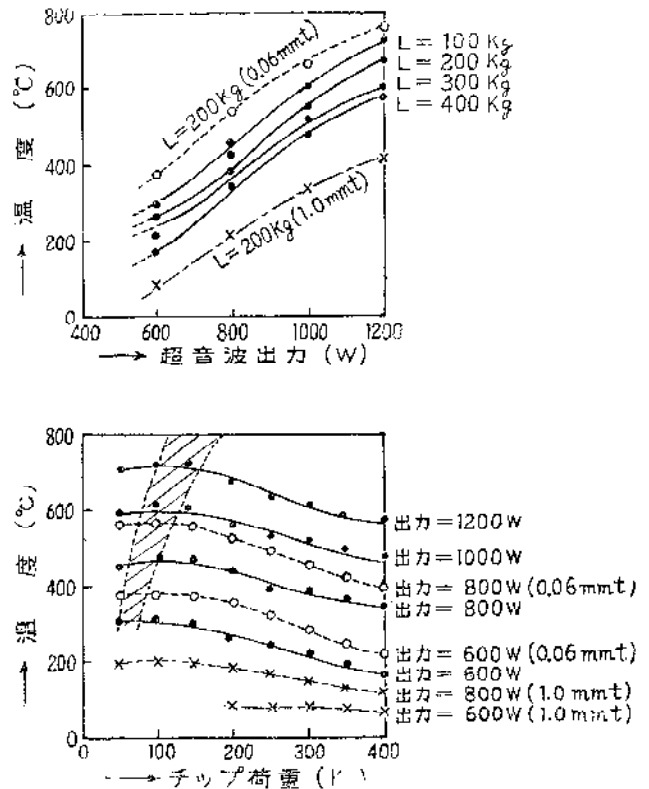
第28図は熱電対のみをチップとアンビルとの間に挿入し、超音波出力およびチップ加圧力を種々変えた場合の共振時間と上昇温度との関係を示したものである。また、第29図は上昇温度とチップ加圧力および上昇温度と超音波出力との関係を示したものである。

これらの図より、接合部における温度上昇は超音波出力の高いほど大となることがわかる。これは同一チップ加圧力のもとでは超音波出力の増加にしたがって振幅が大となり、接合部に大きな剪断力が加わるためである。

しかし、チップ加圧力と温度との関係については、同一超音波出力のもとでは最高の温度上昇を与えるチップ加圧力の増加にしたがって振幅が低下せられるためである。また、チップ加圧力の極端に低い場合に温度上昇があまりみられないのは、振幅は大きい加圧力不足のため接合部に加わる剪断力（摩擦を意味する）が小さいためであろう。

また、同一条件において共振時間の経過とともに温度上昇が小さく（2～3 sec 以後ではほぼ同一になる）なるのは、熱電対が接合されると、そこではもはや磨擦が生じないため熱の発生が減じられるためであろう。

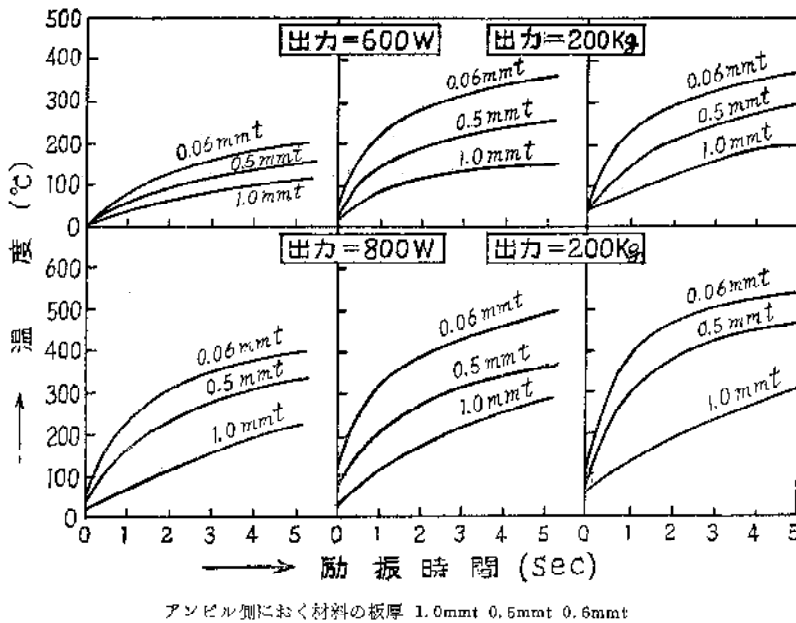
熱電対を被接合材料の間に挿入した場合の共振条件と接合部における温度上昇との関係は、上述の熱電対のみによる場合とほぼ同様の傾向を示す。第30図はチップ加圧力と上昇温度および超音波出力と上昇温度との関係を示したものである。



第30図 超音波出力と昇温度、チップ荷重と昇温度との関係0.5mmtチタニウム同志の間に熱電対を挿入

しかし、被接合材料接触間に熱電対を挿入した場合は、熱電対のみによる場合にくらべ同一共振条件においては温度の上昇が少し低い、また、板厚の大なるにしたがって温度上昇は低くなる。これは、被接合材料の影響をうけ、チップの先端の丸味（R）に対してその接触面における凹みが小さくなり板厚（が大なるにしたがって逐次その接触面は平坦になる）、かつ、チップの端面より遠ざかるため超音波振動エネルギーが吸収され、この部分に加わる圧縮力および剪断力が小さくなるためであろう。

また、アルミニウムあるいは鉛同志の間に熱電対を挿入した場合、アルミニウム同志の場合にはチタニウム同志の場合とは大差はないが、鉛同志の場合は温度の上昇は半減する。これはチタニウム同志の場合と同一と励動条件でも、振幅の低下がおこり、それが原因しているよ



第31図 チップ及びアンビル側におく材料の板厚を種々変えたチタニウム同志の間に熱電対を挿入した場合の励振条件と昇温度との関係

うに思う。

異厚材料間に熱電対を挿入した場合は第31図に示したように、同一励振条件においては、チップ側に薄板をおいた方が厚板をおいた場合に比べ温度上昇は高い。

これは、上述のようにチップ側におく材料の板厚が厚くなればなるほど、その間に吸収される超音波振動エネルギーは大きく、したがって、接触面での温度上昇は小となる。

以上のほか、接合部における熱の発生を支配する因子としてチップの先端ならびにアンビル面の形状、あるいはこれらの表面処理状態などが挙げられるが、上昇温度におよぼす効果はほかの励振条件超音波出力、チップ加圧力、励振時間、被接合材料の種類ならびに板厚などに比べて少ない。

6. 超音波による接合部の強度と接合諸条件との関係

さきに超音波による接合性と接合諸条件との一般的な関係を述べ、つぎにアルミニウムの接合強度におよぼす接合諸条件の影響ならびにチタニウムと18-8不銹鋼との接合性について2, 3の実験結果を示そう。

6・1 接合性と接合性諸条件との一般的な関係

すべての溶接法についても同様であるように、本接合法においても接合条件として挙げられる因子は上述のように多々ある。以下重要と思われる諸因子について述べる。

6・1・1 チップ加圧力(荷重)

荷重の適否は接合性にもつとも大きく影響するもの

で、これを決定する因子としては次のものが挙げられる。

- ① 被接合材料の機械的性質
- ② 被接合材料の薄いほうの厚み
- ③ 超音波出力の大きさ
- ④ カップリング・システムの幾何学的形状

一般に、薄い材料、軟かい材料、低出力の場合には荷重は小さく、逆に厚い材料、硬い材料、高出力の場合には大きくすればよい。

6・1・2 超音波出力

出力100Wのハンドユニット型から10kw程度のものが製作されているが、将来はさらに大容量のものに発達するであろう。

一般には高融点の硬くて厚い材料では入出力が必要になるが、超音波接合の品質向上を考慮するとき、許

しうるかぎり大出力で、できるかぎり短時間に接合することが望ましいといえる。

6・1・3 接合時間

被接合材料の種類、板厚その他の接合条件により一概にはいえないが、板厚1.0mm以下のものでは0.2~3sec程度、それ以上のものでも10secを越えることはまずない。要は、接合部の外部変形を少なくする意味で、できるかぎり短時間で接合しうる条件を選ぶことが望ましい。

6・1・4 周波数

広い周波数領域で行ないうるがもつとも多く利用されている範囲は15~30kcであつて、厚い材料には低い周波数ほど望ましいといえる。

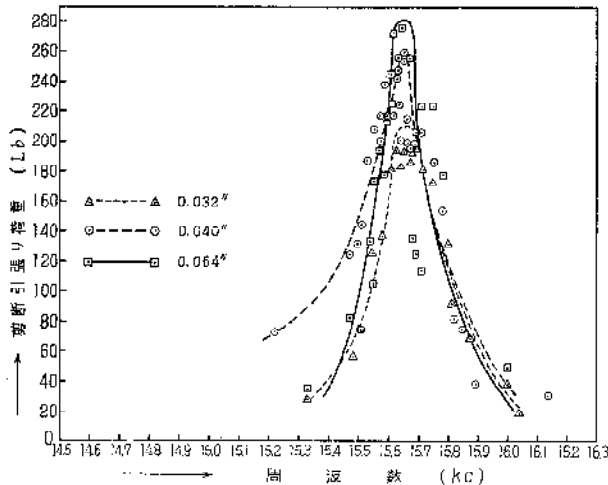
接合開始より接合完了に到るまでの時間はきわめて長時間ではあるが、この間、上述のような接合条件をいずれも最適に維持するために絶対必要な条件は、

- ① 加圧機構のきわめて鋭敏な送り感度
- ② 高精度の周波数自動追尾機構

である。

いま、周波数と接合性との関係をみるに(第32図)、ほかの条件が一定ならば、最適周波数(共振周波数に一致すべきもの)から離調するにしたがつて、振動入力電力は減少し、接合強度は急激に低下する。

さて、接合工程においてまず荷重を加えてしかる後、励振するのが大型接合装置の場合普通行なわれる方法であるが、励振と同時に(被接合材料の種類によつて異なるが)きわめてわずかながら厚みの変形が生じるので、

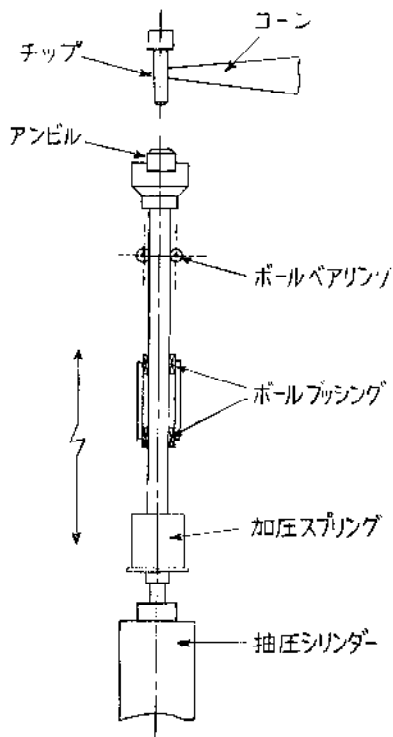


第6図の0.032吋に対する最大振動子入力は325W

0.040吋に対しては 550 W
 0.061吋に対しては 565 W
 荷重はいずれも 165 lb
 接合時間はいずれも 1.5 sec
 チップ端面の球面半径はいずれも 3 in

第32図 1100-H14 アルミニウムの接合部強さにおよぼす周波数の影響例

これに直ちに追従する鋭敏な加圧送り機構がなければ最初に定めた荷重値は信頼できないものとなるし、したがって最適加圧条件を定めることもできかねる。これを、ほぼ満足する送機構としてバネを介して油圧、気圧または歯車機構によりチップであるいはアンピルの支持体を低摩擦のガイドによつて送る加圧方式(第33図)がもつ



第33図 アンビル加圧方式(要領)例

とも有効な手段の一つである。

6・1・5 チップならびにアンピルの形状

接合装置の型式はもちろんのこと、被接合材料の種類、板厚などにより適宜適当に設計すべきで、要は被接合部に伝達される超音波振動エネルギーを減じしめないようにすべきである。

6・1・6 被接合材料の前処理

超音波振動エネルギーを与えることによつて被接合材料接触面の被膜はある程度破壊されるが、やはり被接合材料の表面の清掃はおこたるべきではない。

6・1・7 適用材料

現在までの研究によれば第34図に示したような材料ならびに組合せのものの接合がおおむね可能であるといわれている。

Al	Cu	Ge	Au	Mo	Ni	Rt	Si	Steel	Zr	Ti	
●	●	●	●	●	●	●	●	●	△	△	Al
	●		●	●	●	●	●	●	△	△	Cu
		●									Ge
			●	●	●	●	●				Au
				●	●	●	●				Mo
					●	●	●				Ni
						●	●				Pt
							●				S
								●	△	△	Steel
									●	●	Zr
										●	Ti

● 可能
 △ 研究中のもの

第34図 接合可能金属

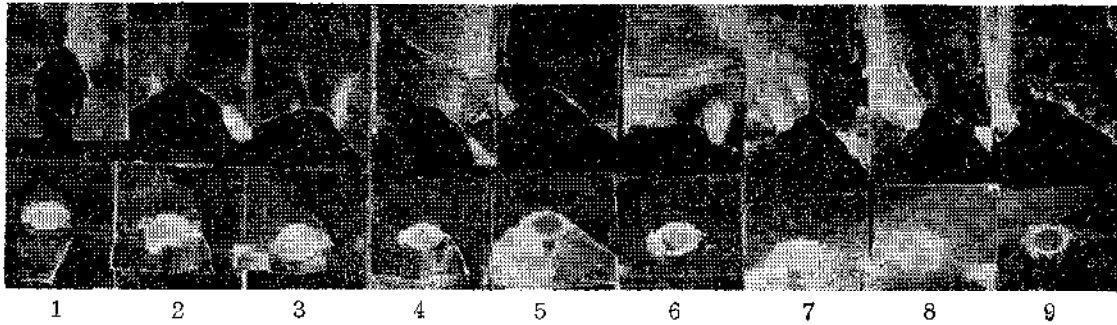
一般にはつぎのような関係がある。

- ① ごく軟かい材料は硬いものよりやや接合しにくい。
- ② 異種材料の場合、硬さの差の小さいほど接合しやすい。
- ③ 異厚材料の場合、チップ側に薄板をおくのがよい。

6・2 アルミニウムの接合強度におよぼす接合諸条件の影響

一般に、板厚の大なるにしたがつて超音波出力および接合時間は大きくする必要がる。しかし、これらが大きすぎるとアルミニウムがチップあるいはアンビルと接合される場合が多く、とくに薄板においてははなはだしい。また、チップ加圧力(荷重のこと、以下同じ)の低いほどこの傾向は大である。この現象を防ぐためにはチップならびにアンピルの表面に oil を塗布するとよい。

つぎに接合諸条件と接合強度との関係であるが、まず、アルミニウム箔についてみるに、いずれの接合片も第35図に示したように、接合部周辺にて破断され、ナゲット径の大なるほどその強度は高い。このナゲット径は超音

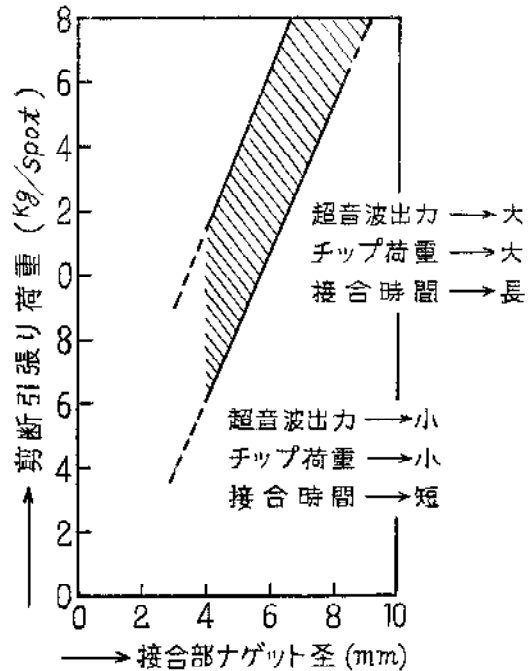


NO	超音波出力 (w)	チップ荷重 (kg)	接合時間 (sec)
1	800	200	0.5
2	1000	"	"
3	1200	"	"
4	1000	100	1.0
5	"	200	"
6	"	300	"
7	800	"	0.5
8	"	"	1.0
9	"	"	3.0

第35図 0.08 mm アルミニウム同志の接合部の断引張り試験片外観

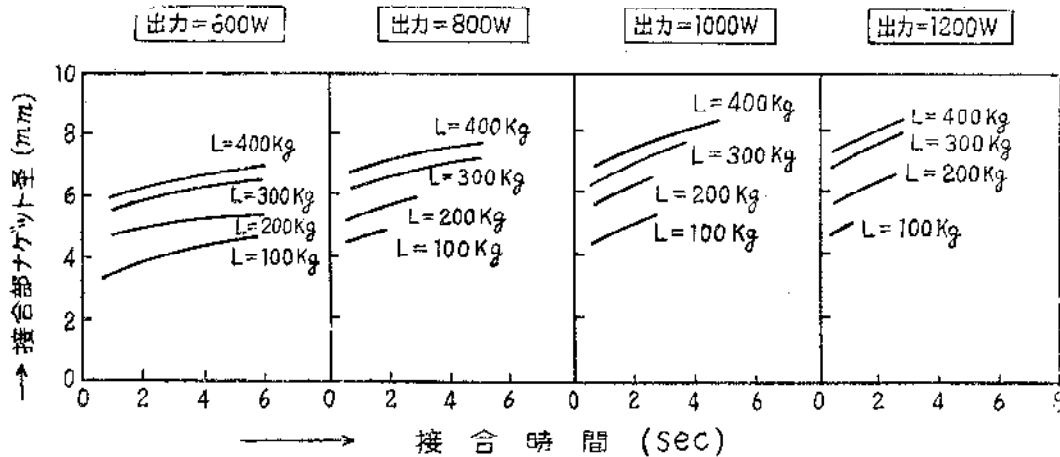
波、接合時間およびチップ加圧力の異なるほど大きい。第36図に接合条件と接合部ナゲット径との関係を、また第37図にナゲット径と接合強度との関係を示した。

これに比べ、0.6 mm 厚アルミニウムにおいては第38図にみられるようにすべて接合部で剪断破壊を示す。この場合も超音波出力および接合時間の異なるにしたがつて、ナゲット径は大きく、その強度も大である。しかし、チップ加圧力については、ほかの条件が一定ならば20~

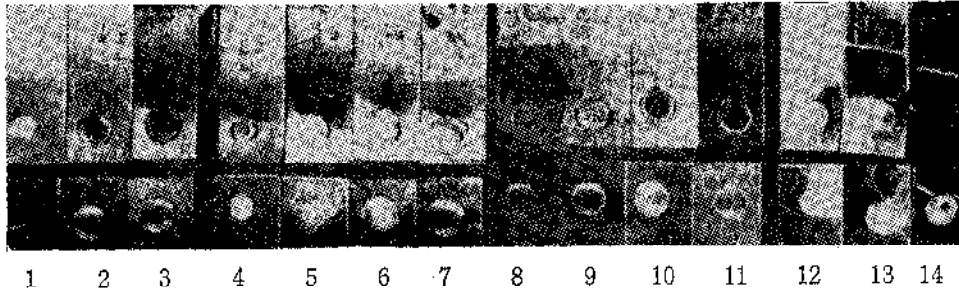


第37図 0.08 mm アルミニウム接合部ナゲット径剪断引張り荷重との関係

30 kg/cm² の範囲で強度は最大強度を与える範囲以下のチップ加圧力にて接合した場合は、全面接合に近いが、ナゲット径は小さく、逆にチップ加圧力が大なる場合は、ナゲット径は大きくなるがリング状あるいは三日月状に



第36図 0.08 mm アルミニウム同志の接合部ナゲット径と接合条件との関係



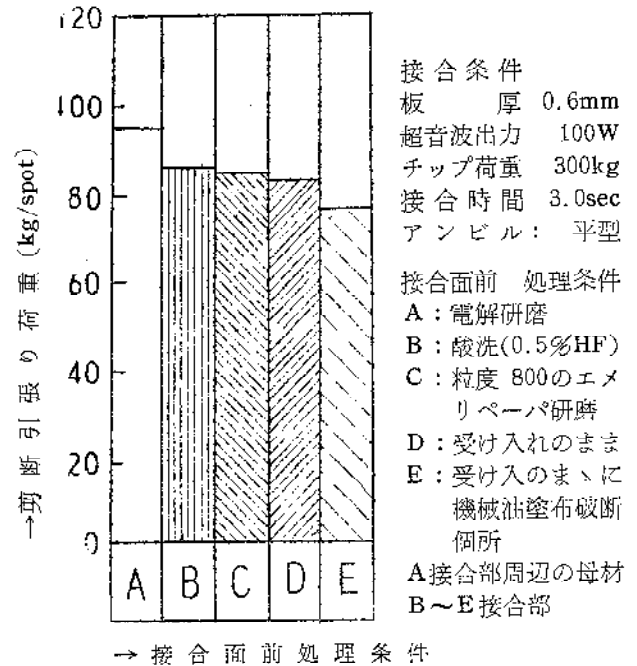
No	超音波出力 (W)	チップ荷重 (kg)	(sec) 接合時間	被接合面前処理
1	600	300	3.0	酸洗い(0.5%HF)
2	1000	"	"	"
3	1500	"	"	"
4	1200	100	"	"
5	"	200	"	"
6	"	300	"	"
7	"	400	"	"
8	800	300	1.0	"
9	"	"	3.0	"
10	"	"	5.0	"
11	"	"	7.0	"
12	600	"	3.0	電解研磨
13	1000	"	"	
14	1200	"	"	

第38図 0.6mmt アルミニウム同志の接合部の剪断引張り試験片外観

接合され、実際の接合面積は小さく、その結果、強度が低下する。

なお、接合時間については、各板厚ともチップまたはアンビルと接合されるまでは時間を増すと超音波出力の場合と同様にナゲット径は大きくなり、接合部強度は大となるが、チップまたはアンビルと接合しはじめると時間を増しても、材料接触部ではそれ以上の接合は行なわれなくなり、むしろ接合部に疲労を与えることになる。

つぎに、0.6 mm 厚アルミニウムの表面処理条件を種々変えた場合の接合強度の比較した一例を示すと第9図のようである。表面を電解研磨した場合は、接合部ナゲットの周辺あるいは母材部で破断するが、その他の場合はすべて接合部剪断破壊を示す。これは金属表面が清浄であればあるほど金属原子の接近が容易になり、強固に接合されることを物語っている。また、電解研磨を施したものでは接合強度のパラッキは非常に小さく（供試材を



第39図 0.6mmt アルミニウムの接合面前処理と接合部強さとの関係、ただしチップおよびアンビルの面は粒度 320 のエメリペーパーで研磨

トリクロールエチレンにて洗滌したもの¹⁴⁾かつ、リング状接合の生ずるような条件でも、ほとんど全面に近い接合が得られる。

つぎに加工度の2・3異なる0.5 mm 厚アルミニウムの接合強度を示すと第1表のようである。

上述のように、同一接合条件においては加工度の異なるほど、加工度の接近している場合ほどその接合強度は大である。これは接合時における金属原子の移動のしやすさによるものといえよう。しかし、加工度が大になり加工硬化のいちじるしくこうむつた場合にはチップ加圧力ならびに超音波出力を大きくして、被接合材料接触面に十分なる圧縮力と剪断力を与えてやる必要がある。

6・3 チタニウムとステンレス鋼との接合性

緒言で述べたように、チタニウムとステンレス鋼あるいは軟鋼との融接においては、たといチタニウムの異種金属側への溶解量を少なくなるようにしたとしても、Ti-Fe、Ti-Cr あるいはTi-C系状態図からわかるように、その接合部はぜい弱なものとなる。

第1表 0.5mm アルミニウム加工度と接合部強さとの関係 kg/spot

チップ側	アンビル側	剪断引張り重	接合状態
焼なまし	焼なまし	42	良
	30%冷間加工	0	不可
	60%冷間加工	6	不可
30%冷間加工	焼なまし	21	や>良
	30%冷間加工	65	良
	80%冷間加工	32	良
60%冷間加工	焼なまし	12	不可
	30%冷間加工	46	良
	60%冷間加工	67	良

接合条件

材料：0.5mm アルミニウム チップ荷重：300 kg
 接合前面処理：酸洗(0.5%HF) 接合時間 3.0 sec
 超音波出力：100W アンビル平型

現在、これらの接合に関しては鉸止め法まろう付け法が採用されている。しかし、鉸止め法においては作業の複雑性や気密性の点で、ろう付け法においてはろう材の選択、ろう付温度の調整あるいは高温加熱にともなうチタニウムの酸化防止などの点でその接合作業は比較的困難である。

ここに、考えられるのが超音波接合法の適用である。以下にチタニウムとステンレス鋼との接合性について2, 3実験を行なった結果を要約しておこう。

チタニウム同志あるいはチタニウムとステンレス鋼との接合における接合性あるいは接合強度と接合諸条件との関係については、アルミニウム同志を接合する場合と同様なことがいえる。しかし、材質が硬く、しかも融点が高いために、被接合材料接触面に高い圧縮力と剪断力とを与え、両金属原子の接近を容易ならしむる必要がある。このためには、チップ加圧力を増加する(凸型のような特殊な形状のアンビルを用いるのもよい)ことが望ましく、したがって超音波出力も増加する必要がある。同一板厚のアルミニウムの接合の場合にくらべてチップ圧力は50~60%、超音波出力は40~70%増加する必要がある。また、接合時間は、100%以上増加する必要がある。

なお、接合性あるいは接合強度は、被接合材料に電解研磨を施すことにより、あるいは適当な厚さのインサートを用いることにより、いちじるしく向上せしめることができる。これらは超音波接合装置の接合能力の向上を意味するものである。

7. むすび

以上、本法の大要と経験の一部を述べた。

本法は、従来の溶接法よりもさらに便利な方法であるというのではなく、ほかの溶接法では実施不能なものや信頼度の乏しいもの、あるいは、不経済なものに対して応用されるべきものであつて、多くの場合接合用チップやアンビルの形状など、すなわち、カップリング・システムの設計を変えることによつて種々の工業分野に適用することができる。

現在、電子、電気工業部品の小物を始めとする精密機器類の接合に應用せられ、工業的施工法についてほぼ確立されているが、今後はさらに大規模な化学、原子力工業に広く本法が適用されるものと思われる。

終りに本稿執筆にさいし御援助賜つた島田理化工業株式会社に対して厚く御礼を申し上げ、ひとまず拙稿を閉じることとする。

なお、本稿執筆にさいし参考とした文献はつぎのようである。

参 考 文 献

- 和田八三久, 工業物理学講座 J—3 (超音波工学)
- 島田理化工業 K K, 超音波
- 渡辺直行, 金属 7/1958
- 西村源六郎他, 金属 5/1959
- 安積健治郎, 溶接界 2/1960
- 著者, 溶接技術 1/1961
- 超音波加工研究会, 超音波加工資料 8/1960
- Byron Jones, Metalprog 4/1958
- Byron Jones, Welding Journal 8/1956
- Byron Jones, Welding Journal 3/1958
- Byron Jones, Welding Journal 6/1960
- W. C patthoff, Welding Journal 2/1960
- N.E. Weare, J. N. A. and R. E. Monroe, Welding Journal 8/1960
- W. C. Potthoff others, Ultrasonic Welding of Electronic Components, 1960 Aeroprojects Incorporated.
- Aluminum Co., of America International Dept., Ultrasonic Metal Joining With Sonoweld Equipment, 7/1960
- A.L. Phillips, Ultrasonic Welding, American Welding Society, 1960
- 岡田実他, 溶接学会溶接冶金研究委員会資料 9/1961
- 岡田実他, 日本金属学会秋季講演会講演, 10/1961
- 著者, チタニウムおよびチタニウム合金の溶接に関する冶金学的研究, 1961.